

Н.В. Черная, д-р техн. наук, проф.;
Н.А. Герман, канд. техн. наук, ст. преп.;
Т. В. Чернышева, ст. науч. сотр.; С. А. Дашкевич, студ.
(БГТУ, г. Минск)

ОСОБЕННОСТИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Растительные и синтетические волокна широко применяют в технологии бумаги и картона. Их используют для получения широкого ассортимента бумажной и картонной продукции [1–3], отличающейся свойствами и областью применения. Технология их применения традиционно начинается с процесса диспергирования, который происходит в гидроразбивателях различной конструкции в присутствии воды. Получаемая волокнистая суспензия должна быть однородной, а условия ее приготовления – приемлемыми для каждого конкретного производства и оправданными с технико-экономической и экологической точек зрения.

Растительные волокна являются основными компонентами первичных (целлюлозных) и вторичных (макулатурных) полуфабрикатов. Во всех случаях технология их переработки в технологии бумаги и картона начинается с процесса диспергирования, который традиционно осуществляется на стадии роспуска в гидроразбивателях, отличающихся конструктивными особенностями.

К первичным волокнистым полуфабрикатам относятся 40 видов целлюлозы, полученных по различным способам варки (сульфитному, бисульфитному, моносулфитному, натронному, сульфатному, комбинированным и ступенчатым) хвойных и лиственных пород древесины или их смеси. Последующее применение разнообразных способов многоступенчатой отбелики небеленых видов целлюлозы и облагораживания полученных беленых видов целлюлозы позволяют расширить ассортимент первичных волокнистых полуфабрикатов и, следовательно, расширить область их применения.

Ко вторичным волокнистым полуфабрикатам относятся 13 марок макулатуры (белой и сборной). Макулатура является альтернативным заменителем дорогостоящих и дефицитных разнообразных видов первичных волокнистых полуфабрикатов. Применение макулатуры в технологии бумаги и картона имеет характерные особенности, которые необходимо учитывать при ее переработке.

Синтетические волокна придают бумаге и картону специальные свойства, к числу которых относятся долговечность, пластичность, эластичность, повышенные прочность и влагопрочность, улучшенная упругость, высокая устойчивость к агрессивным средам и др. Разнообразие синтетических волокон и область применения постоянно

расширяются. Их применение в технологии бумаги и картона также начинается с процесса диспергирования.

Основными факторами процесса диспергирования являются:

- концентрация волокнистой суспензии;
- скорость вращения диспергирующего устройства (ротора);
- продолжительность механического воздействия на волокнистое сырье в присутствии воды.

Поэтому важную роль в технологии бумаги и картона играет процесс диспергирования. Его сущность заключается в механическом воздействии в водной среде на «сухое» волокнистое сырье, влажность которого не превышает 15%. Получаемые волокнистые суспензии представляют собой однородные дисперсные системы, в которых дисперсной фазой являются волокна, а дисперсионной средой – вода.

Отсутствие в научной и технической литературе комплексных данных о диспергирующей способности растительного и синтетического сырья обуславливает актуальность настоящей работы с научной и практической точек зрения.

Цель исследования – изучение особенностей процесса диспергирования растительных и синтетических волокон в водной среде в унифицированном оборудовании (при одинаковых условиях стадии роспуска), моделирующем традиционные условия стадии роспуска в гидроразбивателях, распускающих волокнистые полуфабрикаты до однородных волокнистых суспензий.

Для исследования выбраны шесть видов волокнистого сырья:

- целлюлоза сульфатная небеленая хвойная (ГОСТ 11208-82);
- целлюлоза сульфатная беленая хвойная (ГОСТ 9571-89);
- целлюлоза сульфатная небеленая из лиственных пород древесины (ГОСТ 28172-89);
- целлюлоза сульфатная беленая из лиственных пород древесины (ГОСТ 14940-96);
- макулатура (ГОСТ 10700-89);
- синтетические волокна (лавсан – полиэтилентерефталат) (ГОСТ 32085-2013).

Диспергирование волокнистого сырья осуществляли по стандартным методикам. Волокнистые суспензии получали на моделирующем оборудовании: в дезинтеграторе марки БМ-3 и лабораторном комплексе ЛКР-1 в соответствии с прилагаемыми к ним инструкциями. Рабочие концентрации волокнистых суспензий составляли 1 и 6%. Частота вращения ротора составляла 1500 мин⁻¹ для БМ-3 и 4500 мин⁻¹ для ЛКР-1. Продолжительность процесса диспергирования увеличивали от 0,5 до 20,0 мин. Используемое оборудование моделирует работу промышленного оборудования – гидроразбивателей марки ГРВ-03 и ГРВ-05. Они отличаются объемами ванны, на дне которых располагается ротор. Объем ванны со-

ставляет 3 м³ для ГРВ-03 и 5 м³ для ГРВ-05. Частота вращения ротора изменяется от 1500 до 4500 мин⁻¹. Стадию роспуска волокнистого сырья проводят при концентрации волокнистой суспензии в широком диапазоне (1–6%).

Для шести видов волокнистого сырья изучали влияние концентрации волокнистых суспензий (составляла С = 1% и С = 6%), частоты вращения ротора диспергирующего оборудования (составляла 1500 и 4500 мин⁻¹) и продолжительности стадии роспуска (увеличивали от 0,5 до 20,0 мин) на скорость процесса диспергирования (СПД). Результаты исследования представлены в таблице.

Таблица - Влияние вида волокнистого сырья на процесс диспергирования

Вид волокнистого сырья	Условия процесса полного (100%-ного) диспергирования			Скорость процесса диспергирования (СПД), г/мин (в расчете на 15 / 25 г)
	Концентрация волокнистой суспензии (С), %	Частота вращения ротора, мин ⁻¹	Продолжительность (τ), мин	
Целлюлоза сульфатная небеленая хвойная	1	1500	14,0	1,07 / 1,79
	6		8,0	1,88 / 3,13
	1	4500	9,0	1,67 / 2,78
	6		5,0	3,00 / 5,00
Целлюлоза сульфатная беленая хвойная	1	1500	10,0	1,50 / 2,50
	6		7,5	2,00 / 3,33
	1	4500	7,0	2,15 / 3,57
	6		4,5	3,33 / 5,56
Целлюлоза сульфатная небеленая из лиственных пород древесины	1	1500	8,5	1,76 / 2,94
	6		7,0	2,14 / 3,57
	1	4500	6,5	2,31 / 3,85
	6		4,0	3,75 / 6,25
Целлюлоза сульфатная беленая из лиственных пород древесины	1	1500	7,0	2,14 / 3,57
	6		6,5	2,31 / 3,85
	1	4500	6,0	2,50 / 4,17
	6		3,5	4,29 / 7,14
Макулатура марки МС-5	1	1500	7,0	2,14 / 3,57
	6		4,0	3,75 / 6,25
	1	4500	5,0	3,00 / 5,00
	6		3,0	5,00 / 8,33
Синтетические волокна (лавсан – полиэтилентерефталат)	1	1500	4,0	3,75 / 6,25
	6		2,0	7,50 / 12,50
	1	4500	3,0	5,00 / 8,33
	6		1,5	10,00 / 16,67

По способности к диспергированию и скорости протекающего процесса (СПД) исследуемые виды волокнистого сырья располагают-

ся в следующей возрастающей последовательности: целлюлоза небеленая хвойная > целлюлоза беленая хвойная > целлюлоза небеленая из лиственных пород древесины > целлюлоза беленая из лиственных пород древесины > макулатура > синтетические волокна.

Установлено, что минимальные значения СПД имеет целлюлоза небеленая хвойная, а максимальные значения – синтетические волокна.

Сопоставительный анализ результатов комплексного исследования (таблица) позволил установить следующие особенности диспергирования исследуемых видов волокнистого сырья.

Целлюлоза сульфатная небеленая хвойная. Установлено, что повышение концентрации волокнистой суспензии (С) от 1 до 6% при одинаковой частоте вращения ротора (1500 мин^{-1}) способствует сокращению стадии роспуска от 14 до 8 мин (в 1,75 раза), а при 4500 мин^{-1} – от 9 до 5 мин (в 1,6 раза).

Целлюлоза сульфатная беленая хвойная. Установлено, что повышение концентрации волокнистой суспензии (С) от 1 до 6% при одинаковой частоте вращения ротора (1500 мин^{-1}) способствует сокращению стадии роспуска от 14 до 8 мин (в 1,75 раза), а при 4500 мин^{-1} – от 9 до 5 мин (в 1,6 раза).

Получено, что увеличение частоты вращения ротора от 1500 до 4500 мин^{-1} приводит к сокращению продолжительности процесса диспергирования (τ) следующим образом:

при С = 1% значения τ уменьшаются от 14 до 9 мин (в 1,56 раза);

при С = 6% значения τ уменьшаются от 8 до 5 мин (в 1,60 раза).

Полученные данные свидетельствуют о практической возможности управления процессом диспергирования целлюлозы небеленой сульфатной хвойной. Одной из основных причин является необходимость его ускорения на действующих производствах с целью снижения энергетических затрат на стадии роспуска волокнистого сырья, что позволит решить существующую актуальную проблему – энергосбережения.

Следовательно, одновременное повышение концентрации волокнистой суспензии от 1 до 6% и частоты вращения ротора от 1500 до 4500 мин^{-1} позволяет сократить продолжительность процесса диспергирования в 1,56–1,75 раза.

Целлюлоза сульфатная беленая хвойная. Этот вид волокнистого сырья подвергается диспергированию (таблица), когда частота вращения ротора составляет 1500 мин^{-1} – при $\tau = 10$ мин при С = 1% и $\tau = 7,5$ мин при С = 6%, а при увеличении частоты вращения ротора до 4500 мин^{-1} – при $\tau = 7$ мин при С = 1% и $\tau = 4,5$ мин при С = 6%.

Установлено, что при повышении С от 1 до 6% процесс диспергирования ускоряется в $10,0 : 7,5 = 1,33$ раза при частоте вращения ро-

тора 1500 мин^{-1} и $7,0 : 4,5 = 1,56$ раза при частоте вращения ротора 4500 мин^{-1} . Этот положительный эффект можно объяснить увеличением числа контактов волокон с вращающимся ротором, интенсивность механического воздействия которого на диспергируемое волокнистое сырье возрастает с повышением частоты его вращения.

Получено, что повышение частоты вращения ротора от 1500 до 4500 мин^{-1} способствует снижению продолжительности процесса диспергирования (τ) целлюлозы следующим образом: от 10 до 7 мин (в 1,43 раза) при $C = 1\%$ и от 7,5 до 4,5 мин (в 1,67 раза) при $C = 6\%$.

Сравнение способности к диспергированию небеленой целлюлозы с белой свидетельствует о том, что в одних и тех же условиях небеленая целлюлоза диспергируется медленнее, чем белая. Вероятно, это связано с присутствием в ней остаточного лигнина, который оказывает связующее действие на волокна. Окисленный лигнин, содержащийся в белой целлюлозе, частично теряет свое связующее действие на волокна, что способствует ускорению процесса диспергирования.

Следовательно, процесс диспергирования целлюлозы белой хвойной ускоряется в 1,33 и 1,56 раза при повышении концентрации волокнистой суспензии C от 1 до 6% соответственно или в 1,43 и 1,67 раза при увеличении частоты вращения ротора от 1500 до 4500 мин^{-1} соответственно. Одновременное повышение концентрации волокнистой суспензии и частоты вращения ротора способствует сокращению процесса диспергирования в 1,56–1,67 раза, что имеет важное практическое значение с точки зрения получения волокнистой суспензии по энергосберегающей технологии.

Целлюлоза сульфатная небеленая из лиственных пород древесины. Диспергирование этого вида сырья обеспечивает однородность волокнистых суспензий в тех случаях, когда продолжительность механического воздействия ротора (1500 мин^{-1}) составляет $\tau = 8,5$ мин при $C = 1\%$ и $\tau = 7,0$ мин при $C = 6\%$, а при 4500 мин^{-1} – $\tau = 6,5$ мин при $C = 1\%$ и $\tau = 4,0$ мин при $C = 6\%$. При этих условиях степень диспергирования этого вида волокнистого сырья достигает 100%. Полученные суспензии являются однородными, что имеет важное практическое значение для последующего осуществления «качественного» процесса фибриллирования на стадии размола.

Установлено, что увеличение C от 1 до 6% способствует сокращению продолжительности процесса диспергирования в 1,21 раза при 1500 мин^{-1} и в 1,63 раза при 4500 мин^{-1} . Увеличение частоты вращения ротора от 1500 до 4500 мин^{-1} происходит к ускорению процесса диспергирования в 1,31 раза при $C = 1\%$ и 1,75 раза при $C = 6\%$.

Сравнение эффективности процесса диспергирования двух видов целлюлозы небеленой, полученных из хвойных и лиственных по-

род древесины, свидетельствует о том, что для получения однородной волокнистой суспензии во втором случае требуется меньше времени. Это можно объяснить тем, что размеры волокон и формирующиеся из них фибриллы у лиственных пород древесины меньше, чем у хвойных пород. Поэтому количество образовавшихся межфибриллярных связей

у лиственных пород древесины меньше, чем у хвойных.

Следовательно, процесс диспергирования целлюлозы сульфатной небеленой лиственной ускоряется в 1,63–1,75 раза при одновременном увеличении концентрации волокнистой суспензии от 1 до 6% и частоты вращения ротора от 1500 до 4500 мин⁻¹. Установлено, что целлюлоза небеленая лиственных пород древесины диспергируется легче, чем целлюлоза хвойная; это можно объяснить отличием волокон по морфологическому строению и размерам, а также способностью к межфибриллярным взаимодействиям.

Целлюлоза беленая из лиственных пород древесины. Этот вид волокнистого сырья диспергируется, как видно из таблицы, при следующих условиях:

1) при частоте вращения ротора 1500 мин⁻¹ – $\tau = 7,0$ мин при $C = 1\%$ и $\tau = 6,5$ мин при $C = 6\%$;

2) при частоте вращения ротора 4500 мин⁻¹ – $\tau = 6,5$ мин при $C = 1\%$ и $\tau = 3,5$ мин при $C = 6\%$.

Получено, что увеличение концентрации волокнистой суспензии от 1 до 6% позволяет ускорить процесс диспергирования на 7% при 1500 мин⁻¹ и в 1,86 раза при 4500 мин⁻¹. Повышение частоты вращения ротора от 1500 до 4500 мин⁻¹ способствует сокращению продолжительности процесса диспергирования на 7% при $C = 1\%$ и в 1,86 раза при $C = 6\%$.

Сравнение эффективности процессов диспергирования, протекающих для целлюлозы беленой и небеленой, полученных из лиственных пород древесины, свидетельствует о влиянии присутствующего лигнина. В первом случае (беленая целлюлоза) лигнин является окисленным благодаря отбелке целлюлозы, а во втором случае (небеленая целлюлоза) – неокисленным, но являющимся сульфонируемым и остаточным после завершения процесса сульфатной варки лиственных пород древесины.

Сопоставительный анализ эффективности процессов диспергирования, протекающих на стадии роспуска беленой целлюлозы из лиственных и хвойных пород древесины, можно сделать важный вывод о значении морфологической структуры и размеров волокон исследуемых пород древесины на межфибриллярные связи и прочность структурированной сетки: в первом случае (целлюлоза из лиственных

пород древесины) эти связи слабее, а во втором случае (целлюлоза хвойных пород) – сильнее. Поэтому в первом случае по сравнению со вторым появляется возможность провести процесс фибриллирования за более короткий промежуток времени, что является основанием для снижения энергетических затрат на стадию размола и, следовательно, получения волокнистой суспензии по энергосберегающей технологии.

Установлено, что диспергирование белой целлюлозы, полученной из лиственных пород древесины при частоте вращения ротора 1500 мин^{-1} , как видно из табл. 3.4, осуществляется в течение 7,0 мин при $C = 1\%$ и 6,5 мин при $C = 6\%$.

По сравнению с небеленой целлюлозой этот процесс ускоряется на 5–7%. Этот положительный эффект можно объяснить тем, что остаточный лигнин в небеленой целлюлозе оказывает, как правило, связующее действие на волокна, а после его окисления при отбелке целлюлозы – окисленный лигнин ослабляет свое связующее действие на волокна. По этой причине процесс диспергирования происходит «легче», что отражается на сокращении его продолжительности.

Следовательно, целлюлоза белая из лиственных пород древесины диспергируется достаточно быстро (3–7 мин), в то время как для целлюлозы белой хвойной требуется почти в 2 раза больше время (5–14 мин). В обоих случаях полученные волокнистые суспензии имеют степень диспергирования 100% и являются однородными, что гарантируется эффективность протекающего процесса размола.

Макулатура. Установлено, что макулатура диспергируется достаточно быстро (в течение 3–6 мин). При этом 100%-ная степень диспергирования и однородность волокнистой суспензии достигаются при следующих условиях:

1) при частоте вращения ротора 1500 мин^{-1} – $\tau = 6$ мин при $C = 1\%$ и $\tau = 4$ мин при $C = 6\%$;

2) при частоте вращения ротора 4500 мин^{-1} – $\tau = 5$ мин при $C = 1\%$ и $\tau = 3$ мин при $C = 6\%$.

Получено, что увеличение концентрации волокнистой суспензии от 1 до 6% позволяет ускорить процесс диспергирования в 1,5 раза при 1500 мин^{-1} и в 1,67 раза при 4500 мин^{-1} .

Установлено, что повышение частоты вращения ротора от 1500 до 4500 мин^{-1} способствует сокращению продолжительности процесса диспергирования в 1,20 раза при $C = 1\%$ и в 1,33 раза при $C = 6\%$.

Сравнение результатов исследования, полученных для макулатуры и целлюлозы сульфатной белой из лиственных пород древесины, свидетельствуют о незначительном ускорении процесса диспергирования, протекающего в макулатурной суспензии. Это можно объяс-

нить снижением длины волокон в макулатуре по сравнению с данной целлюлозой.

Следовательно, макулатурное сырье диспергируется достаточно быстро (3–6 мин). Этот положительный эффект можно объяснить пониженным содержанием волокон длинной фракции и присутствием волокон средней и мелкой фракций. Неоднородный фракционный состав по волокну ослабляет межволоконные связи, что способствует ускорению процесса диспергирования.

Синтетические волокна. Этот вид волокнистого сырья не имеет реакционно способных гидроксильных групп. Синтетические волокна диспергируются в водной среде при следующих условиях:

1) при частоте вращения ротора 1500 мин^{-1} – $\tau = 4$ мин при $C = 1\%$ и $\tau = 2$ мин при $C = 6\%$;

2) при частоте вращения ротора 4500 мин^{-1} – $\tau = 3$ мин при $C = 1\%$ и $\tau = 1,5$ мин при $C = 6\%$.

Получено, что увеличение концентрации волокнистой суспензии от 1 до 6% позволяет ускорить процесс диспергирования в 2,0 раза при 1500 мин^{-1} и в 4,0 раза при 4500 мин^{-1} . Повышение частоты вращения ротора от 1500 до 4500 мин^{-1} способствует сокращению продолжительности процесса диспергирования в 1,33 раза при $C = 1\%$ и $C = 6\%$.

Следует отметить, что повышенная частота вращения ротора, равная 4500 мин^{-1} , провоцирует процесс флокуляции, в результате чего волокна «скручиваются» между собой, образуя флокулы разного размера. Поэтому полученная волокнистая суспензия содержит 60–70% индивидуальных волокон, 5–15% крупных флокул, 10–20% флокул средних размеров и 10–15% мелких флокул.

Присутствие в волокнистой суспензии флокул различного фракционного состава является нежелательным, поскольку они способны нарушать однородность не только волокнистой суспензии, но и структуры сформированного из него листового материала.

Поэтому при выборе технологического режима получения из синтетических волокон волокнистых суспензий необходимо обеспечить следующие параметры процесса диспергирования:

– частоту вращения ротора диспергирующего оборудования (не должна превышать 4500 мин^{-1});

– продолжительность механического воздействия ротора в водной среде на этот вид сырья (не должна превышать 4 мин);

– концентрацию волокнистой суспензии (желательно не превышать 1%).

Следовательно, синтетические волокна диспергируются в водной среде достаточно быстро ($1,5 \leq \tau \leq 4,0$ мин). Однако при дальней-

шем повышении τ до 15–20 мин они способны к флокуляции, что является нежелательным процессом.

Результаты комплексного исследования позволили установить, что:

– управляемыми технологическими факторами являются концентрация волокнистой суспензии (C), частота вращения ротора (ЧВР) в диспергирующем оборудовании и продолжительность (τ) его механического воздействия на волокнистое сырье в водной среде; при определенных условиях получали волокнистые суспензии, в которых присутствовали волокна со 100%-ной степенью диспергирования (СДВ = 100%);

– размеры волокон (один из управляемых факторов) влияют на скорость процесса диспергирования (СПД); установлена следующая упорядоченная убывающая последовательность по размерам волокон для исследуемых видов волокнистого сырья: целлюлоза небеленая хвойная > целлюлоза беленая хвойная > синтетические волокна > целлюлоза небеленая из лиственных пород древесины > целлюлоза беленая из лиственных пород древесины > макулатура;

– каждый вид волокнистого сырья диспергируется в водной среде до получения однородной волокнистой суспензии, при которой степень диспергирования волокон составляет СДВ = 100%; однако в каждом конкретном случае необходимо обеспечить требуемые технологические параметры на стадии роспуска (C , ЧВР и τ). Определено, что СПД изменяется от 1,78 до 12,50 г/мин при ЧВР = 1500 мин⁻¹ и $1 \leq C \leq 6\%$, а при ЧВР = 4500 мин⁻¹ – от 2,78 до 16,67 г/мин;

– по способности к диспергированию и скорости протекающего процесса (СПД) исследуемые виды волокнистого сырья располагаются в следующей возрастающей последовательности: целлюлоза небеленая хвойная < целлюлоза беленая хвойная < целлюлоза небеленая из лиственных пород древесины < целлюлоза беленая из лиственных пород древесины < макулатура < синтетические волокна;

– на скорость процесса диспергирования (СПД) и, следовательно, его эффективность влияют следующие свойства волокнистого сырья:

- содержание остаточного сульфонированного лигнина (4–7%) в небеленой целлюлозе; он оказывает достаточно сильное связующее действие на волокна и замедляет процесс диспергирования;

- содержание окисленного лигнина (4–7%) в беленой целлюлозе; он оказывает меньшее связующее действие на волокна, чем остаточный сульфонированный лигнин; поэтому беленая целлюлоза диспергируется легче, чем небеленая;

- размеры волокон; длинные волокна (имеют длину 2700–4200 мкм), присутствующие в растительном и синтетическом сырье,

диспергируются труднее, чем короткие (имеют длину 2200–2500 мкм), присутствующие в макулатуре.

– разработаны практические рекомендации по повышению эффективности процесса диспергирования волокнистого сырья в водной среде и получению однородных волокнистых суспензий по энерго-сберегающим технологиям за счет сокращения продолжительности этого процесса:

- для исследуемых шести видов волокнистого сырья рекомендованы предпочтительны диапазоны изменения C , $ЧВР$ и τ , при соблюдении которых обеспечивается получение однородных волокнистых суспензий, для которых $СДВ = 100\%$;

- разработанные технологические режимы получения волокнистых суспензиях в гидроразбивателях ГРВ-03 и ГРВ-05 по сравнению с существующими, когда $15 \leq \tau \leq 40$ мин, свидетельствуют о практической возможности значительного уменьшения τ до следующих значений: для целлюлозы хвойной небеленой до $5 \leq \tau \leq 14$ мин и беленой до $4,5 \leq \tau \leq 10$ мин.

Таким образом, результаты проведенного комплексного исследования позволили, во-первых, сравнить скорости процесса диспергирования исследуемых видов волокнистого сырья в зависимости от условий стадии роспуска в водной среде и, во-вторых, изучить их особенности к диспергированию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология целлюлозно-бумажного производства: справ. материалы. В 3 т. Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 1. Современное состояние производства волокнистых полуфабрикатов, бумаги и картона / ВНИИБ; гл. ред. П. С. Осипов. – Санкт-Петербург: Политехника, 2002. – 420 с.

2. Технология целлюлозно-бумажного производства: справ. материалы. В 3 т. Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 2. Производство полуфабрикатов / ВНИИБ; гл. ред. П. С. Осипов. – Санкт-Петербург: Политехника, 2003. – 633 с.

3. Технология целлюлозно-бумажного производства: справ. материалы. В 3 т. Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 3. Производство полуфабрикатов / ВНИИБ; гл. ред. П. С. Осипов. – Санкт-Петербург: Политехника, 2004. – 316 с.